บทที่ 3

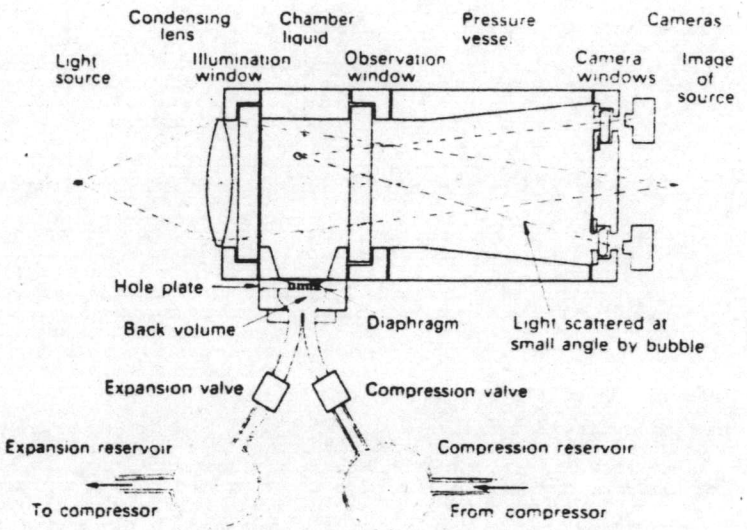
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

รอยทางของเหตุการณ์ต่าง ๆ บนฟิล์ม ที่ทำการกวาด (scan) นับเหล่านี้ได้มาจากการถ่ายภาพภายในห้องฟองที่มีความยาว 2 เมตร กว้าง 0.5 เมตร และลึก 0.5 เมตร ของสถาบัน C.E.R.N. เมื่อทำการยิงอนุภาค K^- ที่มีโมเมนตัม 4.2 GeV/c เข้าไป และทำการถ่ายภาพของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยกล้องถ่ายภาพที่วาง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กัน 3 กล้อง เรื่องราวของห้องฟองจะกล่าวถึงโดยย่อดังนี้

3.1 ห้องฟอง

ห้องฟองเป็นอุปกรณ์ตรวจจับอนุภาคโดยใช้คู่ไปกับเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูงประดิษฐ์โดย ดี.เอ. กลาสเซอร์ ในปี ค.ศ. 1952 ประกอบด้วยถังปิด ด้านหนึ่งเป็นหน้าต่าง (window) มองเห็นภายในได้ ภายในบรรจุของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดปกติ (normal boiling point) โดยมีความกดดันสูงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการเดือดได้ เมื่อความกดดันลดลงอย่างรวดเร็วโดยอาศัยขบวนการขยายตัวของของเหลวภายใน (อาจใช้วิธีการเลื่อนลูกสูบที่อัดของเหลวอยู่) ของเหลวก็จะอยู่ในสภาวะร้อนยวดยิ่ง (superheat) คือของเหลวมีความดันไอ (hydrostatic pressure) มากกว่า ความกดดันไฮโดรสแตติก (hydrostatic pressure) ของเหลวก็จะมีความไม่เสถียรและไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) ในการเกิดฟองเมื่ออนุภาคที่มีประจุผ่านของเหลวในสภาวะนี้ไป ก็จะทำให้เกิดความร้อนเฉพาะที่มีผลทำให้เกิดเป็นแนวของฟองตามทางที่อนุภาคนี้ผ่านไป ต่อจากนั้นก็จะมีการถ่ายภาพไว้ก่อนที่ฟองจะโตเกินไป นำมาศึกษาหาชนิดของอนุภาคที่เกิด พิสัยของการสลายตัว (range), โมเมนตัม เป็นต้น ส่วนประกอบที่สำคัญของห้องฟอง[10] แสดงอยู่ในรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบสำคัญของห้องฟอง



โดยปกติการถ่ายภาพรอยทางในห้องฟองจะถ่ายด้วยกล้องที่ตำแหน่งต่างกัน 3 ตำแหน่ง เรียกว่า สเตอริโอทริเพลท (stereotriplet) ภาพที่ได้จะนำมาวิเคราะห์หาข้อมูลที่ต้องการได้

ของเหลวที่บรรจุในห้องฟองมีหลายชนิด แล้วแต่จุดประสงค์ของการทดลอง มีตั้งแต่ของเหลวที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุด คือ ไฮโดรเจน จนถึงเซนอน (xenon) ที่มีความหนาแน่นมากที่สุด ห้องฟองในระยะแรกมีขนาดเล็กมีความจุเพียง 2–3 ลิตร แต่ต่อมามีการสร้างห้องฟองที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 20,000 ลิตร เพื่อที่จะให้เห็นจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นยากได้มากขึ้น และทำให้เกิดรอยทางยาวเพื่อความแน่นอนในการวัดด้วย โดยทั่วไปห้องฟองจะอยู่ในสนามแม่เหล็กเพื่อประโยชน์ในการหาโมเมนตัมของอนุภาคจากความโค้ง (curvature) ของรอยทาง ส่วนพลังงานและความเร็วของอนุภาคหาได้จาก ระยะทางที่อนุภาคทำให้เกิดรอยทาง และความหนาแน่นเชิงเส้นของจำนวนฟองในรอยทาง

สมบัติของของเหลวชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในห้องฟอง แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติของของเหลวชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในห้องฟอง (11)

Substance	Operating temp.	Operating density, gm/cc	Operating atmospheric pressure	Radiation length, cm	Density, H_2
H_2	27°K	0.057	6 at most	1,800	0.057
He	42°K		1 at most		0
C_3H_8	60°C	0.44	21	118	0.080
$C_3H_8 + CH_3I$					
5%–80	115°C	1.14	25	9.5	0.057
20–80	105°C	0.78	24	17.6	0.057
CF_3Br	32°C	1.57	21	10.5	0
$CF_3Br - CH_3I$	118°C	1.5	25	6	0.026
Xe	-19°C	2.3	25	3.5	0
WF_6	140°C	2.4	20	3.8	0

3.1.1 ขบวนการในห้องฟอง พื้นฐานการเกิดฟองในห้องฟองเป็นไปอย่างง่าย ๆ ถ้าเริ่มต้นให้ของเหลวอยู่ในอุณหภูมิที่เหมาะสมก็จะมีเพียงการควบคุมความดัน วัฏจักรความดัน (pressure cycle) ที่สำคัญมีอยู่ 4 เฟส ด้วยกันดังนี้

เฟสที่ 1 การอัดหรือ ไควเอสเซนท์ เสตท (quiescent state) จะมีความกดดันไฮโดรสแตติค สูงกว่าความดันไอ

เฟสที่ 2 การขยาย ความดันไฮโดรสแตติคจะลดลง ความดันในของเหลวจะน้อยกว่า ความดันไอ และอยู่ในแถบที่มีความไว (sensitive region)

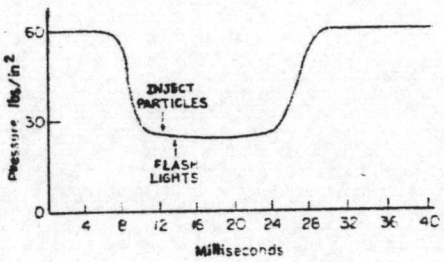
เฟสที่ 3 การเดือด เป็นช่วงที่อนุภาคมีประจุวิ่งผ่าน จะเกิดฟองขึ้น ปล่อยให้มีการขยายตัวเป็นเวลา 2–3 มิลลิวินาที ก็จะถ่ายภาพไว้

เฟสที่ 4 การอัดกลับอีกครั้ง เพื่อให้ห้องฟองคืนสู่สภาพปกติ ไม่มีการเดือดเกิดขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความกดดันและเวลาที่ใช้ในห้องฟองไฮโดรเจนเหลว แสดงดังรูปที่ 3.2

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.2 กราฟระหว่างความดันและเวลาที่ใช้ในห้องฟองไฮโดรเจนเหลว (11)



เฟสที่ 2 และ 4 มีความสำคัญมากเพราะถ้ามีการขยายตัวไม่เร็วพอก็จะเกิดการเดือดขึ้นที่ผิวหน้า จะไม่ทำให้เกิดแถบที่มีความไวเพราะความดันสแตติคยังจะคงมากกว่าความดันไออยู่ ส่วนเฟสที่ 4 ถ้าการอัดกลับอีกครั้งช้าเกินไปของเหลวจำนวนมากก็จะเดือด ซึ่งต้องกินเวลานานในการที่จะกลับมาอยู่ในสถานะของของเหลวใหม่อีกครั้ง ทำให้เวลาในการกลับมาทำงานใหม่ของห้องฟองช้าลง

3.1.2 การเกิดฟอง (11) ฟองที่เกิดในห้องฟองนั้นจะต้องมีรัศมีใหญ่กว่ารัศมีขนาดหนึ่ง เรียกว่า รัศมีวิกฤต (critical radius, r_c) มิฉะนั้นฟองนั้นจะยุบไปไม่ขยายตัวโตขึ้นด้วยตัวเอง ถ้ากำหนดให้

T	คือ	อุณหภูมิของของเหลว
Pv	คือ	ความดันไอ
P_E	คือ	ความดันไฮโดรสแตติค
γ	คือ	แรงดึงผิว
Fc	คือ	แรงที่ทำให้ฟองรัศมี r_c ยุบตัวลง

จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Fc = 2\pi r \gamma + \pi r^2 P_E \qquad (3.1)$$

ถ้าให้ Fx คือ แรงทั้งหมดที่ดันให้ฟองขยายตัว

จะได้ว่า $Fx = \pi r^2 P_v$ (3.2)

ในกรณีที่ให้แรงจากสมการ (3.1) และ (3.2) เท่ากัน นั่นคือ รัศมีของฟองก็คือ c นั่นเอง ดังนั้น รัศมีวิกฤตของฟองที่หาได้คือ

$$r_c = \frac{2\gamma}{Pv - P_E} \quad (3.3)$$

อนุภาคมีประจุ จะต้องสูญเสียพลังงานไปตามทางวิ่งเพียงพอที่จะทำให้เกิดเม็ดฟองขึ้นได้มีขนาดรัศมีเท่ากับหรือใหญ่กว่ารัศมีวิกฤตตามสมการที่ (3.3) นั่นเอง ซึ่งถ้าให้

Emin คือ พลังงานที่น้อยที่สุดที่จะทำให้เกิดฟองมีรัศมีเท่ากับ r_c

แล้วจะได้ว่า

$$Emin = 4\pi\gamma r_c^2 + \frac{4\pi r_c^3}{3} + N_r H + \frac{4\pi r_c^2 P_E}{3} \quad (3.4)$$

เมื่อ N_r คือ จำนวนโมลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิ T

H คือ ความร้อนของการกลายเป็นไอ (vaporization)

จากสมการที่ (3.4) พิจารณาเทอมต่าง ๆ คือ

เทอมแรก เป็น พลังงานผิว (surface energy)

เทอมที่ 2 เป็น พลังงานที่ต้องการเปลี่ยนโมเลกุลของของเหลวให้เป็นโมเลกุลของก๊าซ

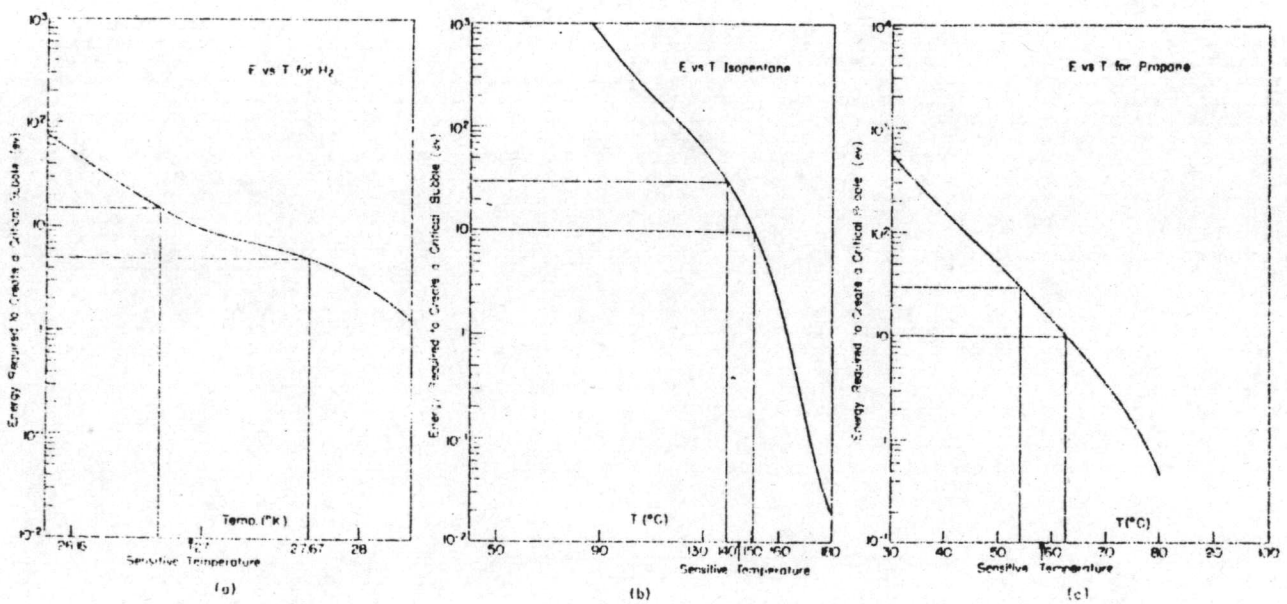
เทอมที่ 3 เป็น พลังงาน P - V ที่ต่อต้านความกดดันไฮโดรสแตติค

โดยใช้ กฎของก๊าซสมบูรณ์และคุณสมบัติบัลค์ (bulk) ของสาร จะทำให้สมการ (3.4) กลายเป็นดังสมการที่ (3.5)

$$Emin = \frac{32 H \pi P_v \gamma^3}{3 KT(P_v - P_E)^3} + \frac{16 \pi \gamma^3}{(P_v - P_E)^2} + \frac{32 \pi P_E \gamma^3}{3 (P_v - P_E)^3} \qquad (3.5)$$

ในสมการ (3.5) ทุกปริมาณทางขวามือขึ้นกับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ถ้าเขียนกราฟระหว่าง Emin ของไฮโดรเจนเหลวเป็นฟังชั่นของอุณหภูมิก็จะได้ดังรูปที่ 3.3 (a) ส่วนรูปที่ 3.3 (b) และ 3.3 (c) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Emin ของไอโซเพนเทน (isopentane) และโพรเพน (propane) เป็นฟังชั่นของอุณหภูมิตามลำดับ

รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับพลังงานน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดฟองของไฮโดรเจน, ไอโซเพนเทน และโพเพน



3.1.3 การสูญเสียพลังงานของอนุภาคยิงในห้องฟอง[1,13]

เป็นที่ทราบแล้วว่า เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านของเหลวในห้องฟอง จะถ่ายเทพลังงานให้ของเหลวนั้น ทำให้อิเลคตรอนหลุดออกมาเป็นอิสระ เกิดอิออนคู่ (ion pair) ขึ้นเรียกว่า การไอออนไนซ์ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดฟอง ความสัมพันธ์ของการสูญเสียพลังงานของอนุภาคยิง โดยการไอออนไนซ์ต่อความยาวของรอยทาง หรือ Stopping power คือ

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi z^2\left(\frac{e}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{1}{mv^2} N.B. \qquad (3.6)$$

เมื่อ e, m เป็น ประจุ และมวลของอิเลคตรอนเมื่ออยู่นิ่ง

ϵ_0 เป็น permittivity of free space

e, v เป็น ประจุ และความเร็วของอนุภาคยิง

N เป็น จำนวน stopping atom ต่อปริมาตร

B เป็น Stopping number

จากสมการ (3.6) จะได้ B เป็น

$$B = z\left(\ln\frac{2mv^2}{I} - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 - \frac{C_k}{z}\right) \qquad (3.7)$$

โดยที่ z เป็น จำนวนของอิเลคตรอนในอะตอมของของเหลว

I เป็น average excitation energy ของอะตอม

C_k เป็น small correction factor

และ β คือ v/c

3.2 เครื่องฉายภาพและฟิล์มภาพถ่ายจากห้องฟองไฮโดรเจนเหลว

เหตุการณ์ของแต่ละเฟรมในห้องฟองจะได้รับการถ่ายไว้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กัน 3 ตำแหน่ง จากกล้องและทำการถ่ายต่อเนื่องกันไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะหมดม้วนฟิล์ม ดังนั้นภาพเหตุการณ์ที่ถ่ายต่อเนื่องกัน 1ชุด จะประกอบด้วยฟิล์ม 3 ม้วน ที่แสดงด้วย หมายเลขของ seri H เดียวกัน มีหมายเลขประจำเฟรมกำกับทุกเฟรมต่อเนื่องกันไปตามลำดับ พร้อมทั้งบ่งว่าฟิล์มแต่ละม้วนถ่ายด้วยกล้องใด (หมายเลข 1, 2 และ 3) ซึ่งทำให้ทราบถึงตำแหน่งที่ทำการถ่ายได้

เครื่องฉายภาพของฟิล์มที่จากห้องฟอง

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกวาดภาพเพื่อดูเหตุการณ์ต่าง ๆ จากฟิล์มภาพถ่ายทั้ง 3 ม้วน ในแต่ละชุด ลักษณะของเครื่องมือเป็นดังรูปที่ 3.4

ตัวเครื่องมือมีขนาดใหญ่ ประกอบด้วยส่วนใหญ่ ๆ 3 ส่วนคือ

1. ส่วนบรรจุฟิล์มและกล้องฉายภาพ
2. กระจกสะท้อนแสง
3. ฉากรับภาพ

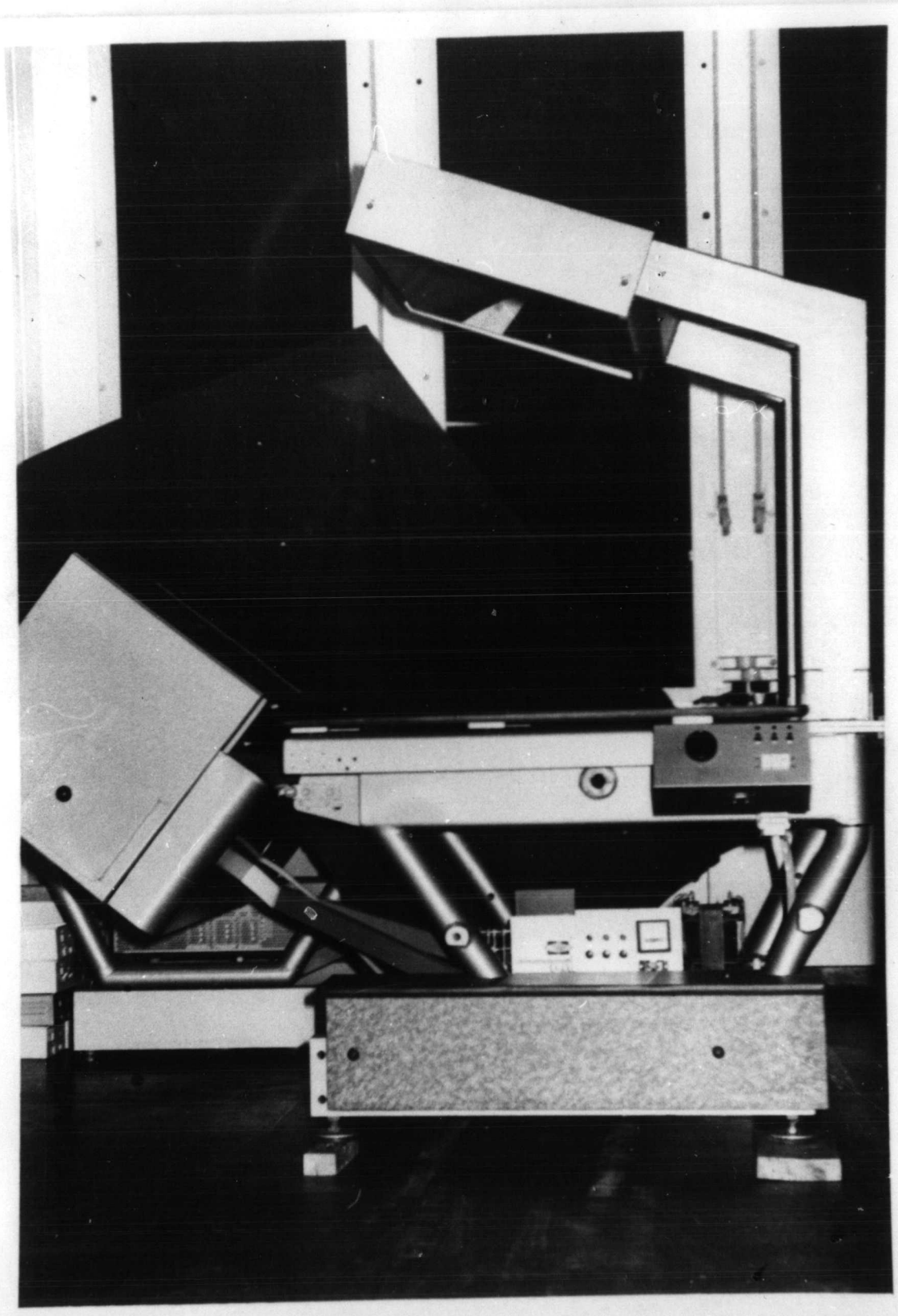
กล้องฉายภาพมี 3 กล้อง ลักษณะคล้ายเครื่องฉายสไลด์ จะให้ภาพจากฟิล์มไปตกบนกระจกเงาที่อยู่ด้านบน แล้วสะท้อนกลับมาตกลงบนฉาก มีขนาดขยายใหญ่และเป็นภาพหัวกลับ ดังนั้นในการฉายภาพต้องใส่ม้วนฟิล์มให้กลับทิศทางกับที่ต้องการดู การดูภาพของแต่ละกรอบ เมื่อต้องการดูภาพจากกล้องหมายเลขใด ก็กดสวิทช์สำหรับบังคับปิด–เปิด ต้นกำเนิดแสงประจำกล้องนั้น เพื่อให้มีแสงผ่านฟิล์มแล้วได้ภาพที่ต้องการไปตกบนฉากรับภาพ

การเลื่อนฟิล์มเพื่อกวาดหาภาพของเหตุการณ์ในแต่ละกรอบ กระทำได้โดยหมุนปุ่มบังคับไปทางซ้ายหรือขวา เพื่อให้ฟิล์มเดินหน้าหรือถอยหลังไปพร้อมกันทั้ง 3 ม้วน ในขณะเดียวกัน (เพื่อให้กรอบที่กำลังกวาดภาพนั้นเป็นกรอบเดียวกันทั้ง 3 กล้อง) หรือต้องการเลื่อนฟิล์มเฉพาะกล้องใด กล้องหนึ่งก็กระทำได้ โดยกดปุ่มเลื่อนฟิล์มเฉพาะกล้องที่ต้องการเพียงกล้องเดียวเท่านั้น

การกวาดภาพกระทำในห้องที่ค่อนข้างมืด จึงจะเห็นรอยทางของอนุภาคได้ชัดเจน ดังนั้น จึงต้องสร้างฉากสำหรับบังแสงจากภายนอก ภายในห้องทดลองด้วย

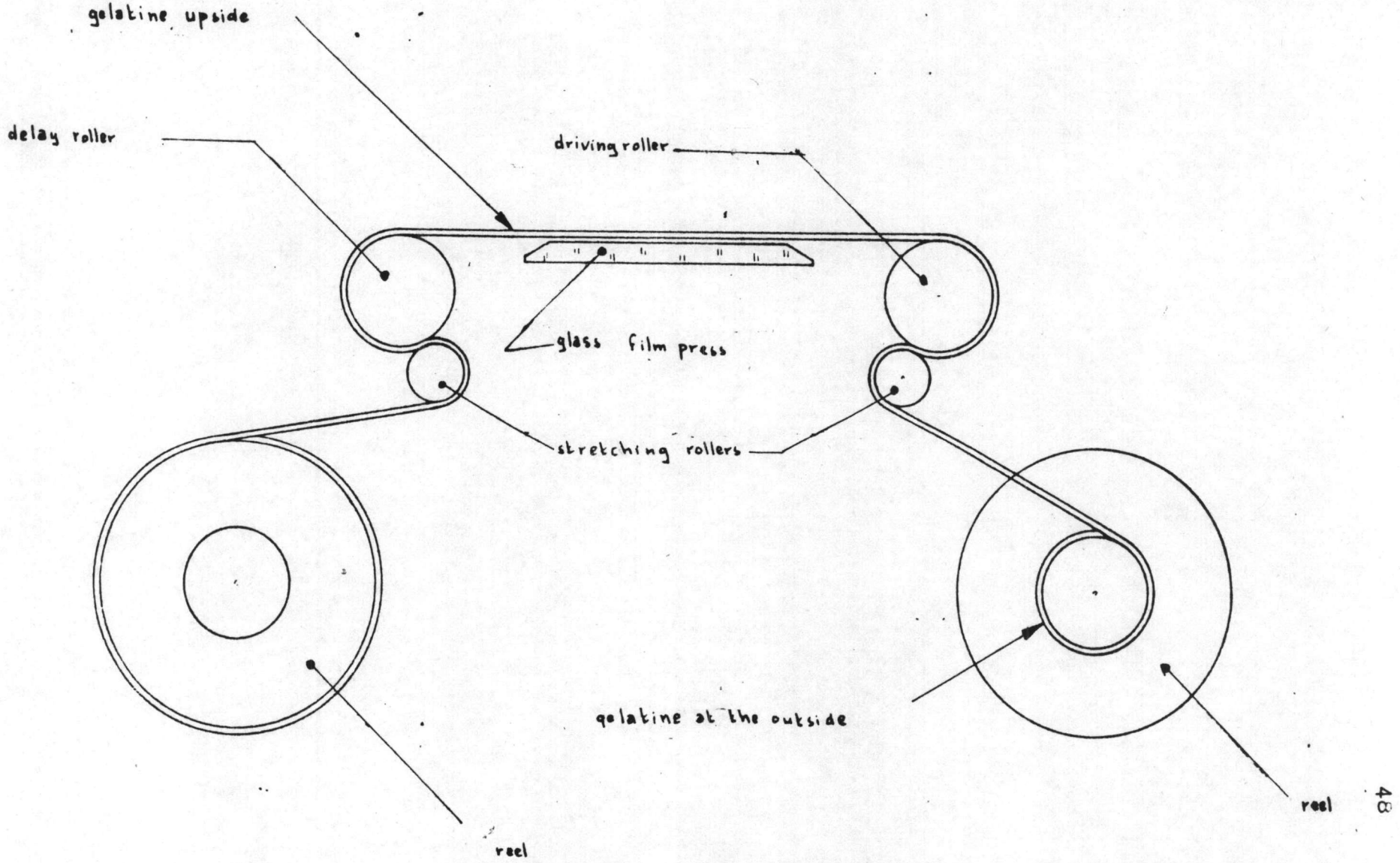
ลักษณะการใส่ฟิล์มภาพถ่ายในเครื่องฉายภาพของแต่ละกล้อง กระทำได้ดังแผนภาพรูปที่ (3.5) ส่วนรูปที่ (3.6) เป็นลักษณะภายในของเครื่องฉายภาพ

รูปที่ 3.4 ลักษณะและส่วนประกอบของเครื่องฉายภาพของฟิล์มที่ได้จากห้องฟอง



รูปที่ 3.5 แผนภาพการใส่ฟิล์มภาพถ่ายในเครื่องฉายฟิล์ม

film inlay


gelatine upside
delay roller
driving roller
glass film press
stretching rollers
gelatine at the outside
reel
reel

รูปที่ 3.6 รูปลักษณะภายในของเครื่องฉายฟิล์มภาพถ่าย